

Klaus Dieterich, Darmstadt

Schwingfestigkeitsverhalten punktgeschweißter verzinkter Feinbleche ohne und mit Korrosions- einfluß

Sonderdruck aus Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 25 (1994) Nr. 6, S. 252–263

Bericht Nr. 123
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.

Schwingfestigkeitsverhalten punktgeschweißter verzinkter Feinbleche ohne und mit Korrosionseinfluß

K. Dieterich

Das Schwingfestigkeitsverhalten von verzinkten und schwarzen, durch Einzelpunktschweißung gefügten Feinblechen der Sorten RSt 14, St 14 ZE 25/25, St 14 ZE 75/75, St 06 Z 140 und St 06 ZF 140 wird untersucht. Aus Wöhler- und Betriebsfestigkeitsversuchen an Luft und unter einer 5% NaCl-Lösung bzw. Kondenswasser werden Angaben zu den Wöhler- und Lebensdauerliniencharakteristika, den ertragbaren Belastungen, den Anrißschwingspielzahlen und Schadenssummen abgeleitet.

Fatigue Behaviour of Spotwelded Galvanized Sheets with and without Corrosive Influence

The fatigue behaviour of spotwelded sheets from the steels RSt 14, St 14 ZE 25/25, St 14 ZE 75/75, St 06 Z 140 and St 06 ZF 140 was investigated. Tests with these connections under constant and variable amplitude loading were carried out in air, in a 5% NaCl-solution and under condenser water. The results are presented as endurable stresses and cycles to crack initiation. Further, from the comparison of constant and variable amplitude testing damage sums are derived.

1 Einleitung

Zur Erhöhung der Gebrauchsdauer von Stahlbauteilen unter atmosphärischen Bedingungen wird zunehmend auf eine Verzinkung der Stahloberfläche als Korrosionsschutz zurückgegriffen. Diese Schutzmaßnahme wird in steigendem Maße auch für Blechkonstruktionen eingesetzt, wobei als Fertigungsverfahren vor allem die Verzinkung des Vormaterials mit anschließender Fügung durch Punkt- oder Buckelschweißen eingesetzt wird.

Im Zuge der kontinuierlichen Zunahme gewichtsoptimierter selbsttragender Leichtbaukonstruktionen, z. B. im Karosserie- und Waggonbau, in der Luft- und Klimatechnik sowie in der Hausgerätefertigung, stehen dabei Fragen nach den Schwingfestigkeitseigenschaften der Punktschweißverbindung im Vordergrund, die als statistisch abgesicherte Kennwerte abhängig vom eingesetzten Werkstoff, von der Oberflächenbeschaffenheit und den Schweißbedingungen sowie von der Beanspruchungsart und den Umgebungsbedingungen ermittelt werden müssen.

Unter diesem Gesichtspunkt sollte eine Bewertungsbasis zum Schwingfestigkeitsverhalten unverzinkter und verzinkter Feinbleche erarbeitet werden, wobei als Einflußgrößen Werkstoffe, Verzinkungsverfahren, Zinkschichtdicke, mögliche Schweißkombinationen aus unverzinkten und verzinkten Blechen, Belastungsart (Wöhler- bzw. Zufallslastenversuch) und Umgebungsbedingungen (Luft bzw. Tausalzkorrosion) Berücksichtigung finden sollten.

Neuere Arbeiten und Vorträge nehmen insbesondere Bezug zu den Fragen der Qualitätssicherung in der Serienfertigung und den dazu notwendigen Definitionen von reproduzierbaren und kontrollierbaren Güteigenschaften sowohl im Fertigungsprozeß als auch an der fertigen Verbindung [z. B. 1 bis 4]. Aussagen zu diesen Themen erhalten steigende Bedeutung aus dem Bemühen, die in der Bemessung von Punktschweißverbindungen heute noch bestehenden Unsicherheiten auf ein Minimum zu reduzieren.

Zum Schwingfestigkeitsverhalten punktgeschweißter Proben bzw. Bauteile sind eine Reihe von Literaturstellen verfügbar [z. B. 5 bis 11], die unter der für die jeweilige Zielsetzung in bezug auf Grundmaterial, Blechdicke, Probenform und Belastungsart getroffenen Parameterwahl stark voneinander abweichende Einzeluntersuchungen behandeln. Leider liegen bislang keine gesicherten Versuchsergebnisse vor, die als brauchbare Vergleichsbasis zu der Bewertung des Schwingfestigkeitsverhaltens verzinkter Feinbleche herangezogen werden können. Diese Aussage gilt erst recht, wenn in die Literaturrecherche die zusätzlichen Einflußgrößen „verzinktes Feinblech“, „Zufallslastenfolge“ und „Korrosionseinfluß“ einbezogen werden.

2 Zielsetzung

Um das Schwingfestigkeitsverhalten punktgeschweißter unverzinkter und verzinkter Feinbleche in den häufig eingesetzten Werkstoffqualitäten St 14 nach DIN 1623 sowie Sorte V nach DIN 17 162 ausreichend zu kennzeichnen, müssen der Oberflächenschutz des Vormaterials nach seiner Herstellungsart (feuer- bzw. elektrolytisch verzinkt) und die Schichtdicke, die Weiterverarbeitung durch Punktschweißen sowie mögliche Kombinationen aus unverzinkten, unverzinkten/verzinkten und verzinkten Blechen, wie folgt, variiert werden:

- Feinblech nach DIN 1623, St 14
 - a) unverzinkt
 - b) elektrolytisch verzinkt, Schichtdicke 2,5 µm
 - c) elektrolytisch verzinkt, Schichtdicke 7 µm
- Feinblech nach DIN 17 162, Sorte V
 - a) feuerverzinkt, Schichtdicke 10 µm
 - b) feuerverzinkt, Schichtdicke 10 µm, und anschließend galvannealed (durchgewachsene Eisen-Zink-Legierungsphasen).

Die Blechdicke wurde einheitlich auf 0,88 mm festgelegt.

Die vorgesehenen Schweißvarianten für die punktgeschweißten Fügungen entstanden aus den möglichen Blechkombinationen unverzinkt/unverzinkt, unverzinkt/verzinkt und verzinkt/verzinkt.

In den Schwingfestigkeitsversuchen wurden zunächst für atmosphärische Bedingungen die Wöhlerlinienstreubänder mit statistisch auswertbaren Versuchsreihen im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich so belegt, daß eine Ableitung charakteristischer Kennwerte für die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden, den Abknickpunkt von der Zeit- zur Dauerfestigkeit sowie die im Zeit- und Dauerfestigkeitsgebiet anzusetzenden Streubreiten möglich ist [12].

Neben Punktschweißproben mit optimal eingestellten Schweißparametern wurden in das Gesamtversuchsprogramm auch Schweißbedingungen mit einbezogen, wie sie sich gegen Ende in der industriellen Serienfertigung ausnutzbarer Elektrodenstandzeiten ergeben können.

Den Ergebnissen aus der Prüfung an Luft wurden in vergleichbarer Breite ermittelte Korrosionsschwingfestigkeitswerte gegenübergestellt, wie sie sich aus Versuchen unter den korrosiven Umgebungsbedingungen einer Tauszalzlösung mit 5% NaCl-Gehalt ergeben. Stichprobenartig wurden auch die in der Praxis häufig gegebenen Korrosionsbedingungen aus einer Kondenswasserbildung im Fügespalt mit einbezogen.

In einem zweiten Schritt wurden für bestimmte aus dem Einstufen-Versuchsprogramm ausgewählte Schwerpunktvarianten auch Betriebsfestigkeitsversuche unter einem zufallsartig wechselnden Last-Zeit-Ablauf durchgeführt.

Da aufgrund erwarteter Unterschiede in den Wöhlerlinienverläufen für Luft und unter Korrosion Abweichungen auch im Hinblick auf das Schädigungsverhalten unter der Zufallslastenfolge anzunehmen sind, wurden die Betriebsfestigkeitsversuche sowohl an Luft als auch unter Korrosionsbedingungen durchgeführt.

3 Versuchswerkstoffe und Probenherstellung

3.1 Proben und Versuchsplan

Aus fünf verschiedenen kaltgewalzten Stahl-Feinblechsorten, von denen vier verzinkt waren, wurden U-förmige Blechteile hergestellt. Die Verzinkungsvarianten waren den derzeitigen Schwerpunkten bei der industriellen Verarbeitung verzinkter Feinbleche angepaßt, in denen für die Feuerverzinkung Schichtdicken im Bereich von 10 µm, für die elektrolytische Verzinkung im Bereich 7 µm dominieren (Tab. 1). Der zunehmenden Tendenz in Richtung weiter verringerter Schichtdicken trug die zusätzliche Werkstoffvariante mit 2,5 µm Zinkschichtdicke Rechnung. Neben den herkömmlich feuerverzinkten Blechen wurden auch Bleche in die Untersuchung einbezogen, bei denen im unmittelbaren Anschluß an das Verzinken eine Glühbehandlung nachgeschaltet wurde (galvannealed) [13]. Je zwei dieser U-förmigen Teile waren dann durch Punktschweißung mit einem mittig gesetzten Einzelpunkt zu der Dauerschwingprobe gefügt worden, Abb. 1. Dabei wurden alle Blechvarianten mit sich selbst und alle verzinkten Varianten mit schwarzem Blech kombiniert. Außerdem wurde eine Probenvariante hergestellt, bei der elektrolytisch verzinktes Blech (Schichtdicke 7 µm) mit feuerverzinktem Blech (Schichtdicke 10 µm) gepaart wurde. Der Punktdurchmesser entsprechend einer guten Parametereinstellung beim Punktschweißen betrug $5,3 \pm 0,1$ mm (Schweißqualität "1"), für ungünstige Bedingungen, wie sie sich in der industriellen Serienfertigung gegen Ende der Elektrodenstandzeiten ergeben können, $3,6 \pm 0,1$ mm (Schweißqualität "2"). Die Güte der Schweißverbindungen wurde durch Abrollversuche, Zugversuche, durch Torsions-

Tabelle 1. Versuchsvarianten der Schweißpunktverbindungen.

Table 1. Test combinations for the investigation of spot welded connections.

| Werkstoff (Kurzbezeichnung) | Werkstoff (Feinblech nach) | Oberflächenkombination |
|--------------------------------|-------------------------------|---|
| R St 14 | DIN 1623 | unverzinkt |
| R St 14 | DIN 1623 | unverzinkt |
| St 14 ZE 25/25 | DIN 1623 | elektrolytisch verzinkt, Schichtdicke 2,5 µm |
| St 14 ZE 25/25 | DIN 1623 | elektrolytisch verzinkt, Schichtdicke 2,5 µm |
| St 14 ZE 75/75 | DIN 1623 | elektrolytisch verzinkt, Schichtdicke 7 µm |
| St 14 ZE 75/75 | DIN 1623 | elektrolytisch verzinkt, Schichtdicke 7 µm |
| St 06 Z 140 | DIN 17162 | feuerverzinkt, Schichtdicke 10 µm |
| St 06 Z 140 | DIN 17162 | feuerverzinkt, Schichtdicke 10 µm |
| St 06 ZF 140 | DIN 17162 | feuerverzinkt, Schichtdicke 10 µm, galvannealed |
| St 06 ZF 140 | DIN 17162 | feuerverzinkt, Schichtdicke 10 µm, galvannealed |
| R St 14 | DIN 1623 | unverzinkt |
| St 14 ZE 25/25 | DIN 1623 | elektrolytisch verzinkt, Schichtdicke 2,5 µm |
| R St 14 | DIN 1623 | unverzinkt |
| St 14 ZE 75/75 | DIN 1623 | elektrolytisch verzinkt, Schichtdicke 7 µm |
| R St 14 | DIN 1623 | unverzinkt |
| St 06 Z 140 | DIN 17162 | feuerverzinkt, Schichtdicke 10 µm |
| R St 14 | DIN 1623 | unverzinkt |
| St 06 Z 140 | DIN 17162 | feuerverzinkt, Schichtdicke 10 µm, galvannealed |
| St 14 ZE 75/75 | DIN 1623 | elektrolytisch verzinkt, Schichtdicke 7 µm |
| St 06 Z 140 | DIN 17162 | feuerverzinkt, Schichtdicke 10 µm |

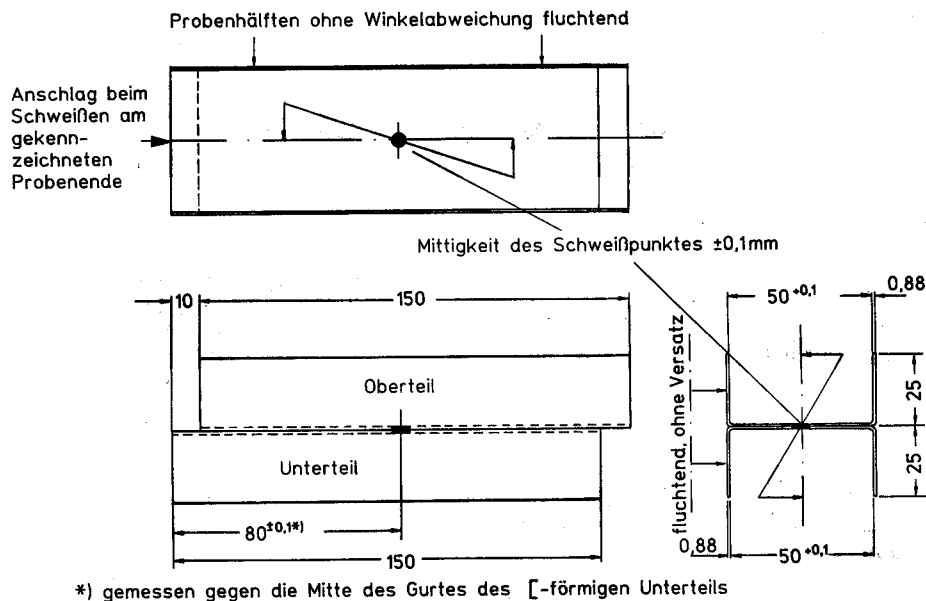


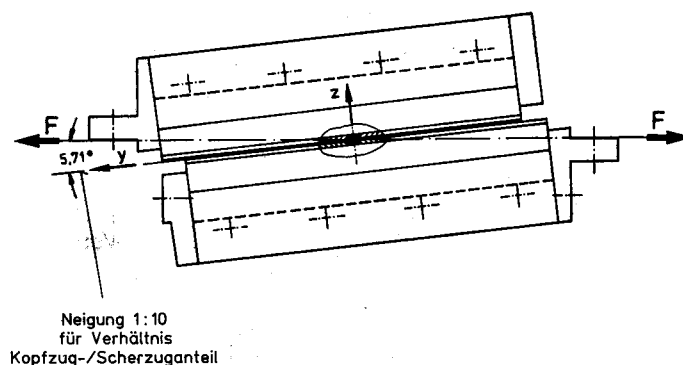
Abb. 1. Punkgeschweißte Blechprobe.

Fig. 1. Spot welded specimen.

prüfung, durch metallographische Beurteilung und durch Härtemessungen überprüft. Weitere Angaben zur Herstellung der Proben und deren Güteüberprüfung finden sich in [14].

3.2 Punktschweißen

Die Punktschweißung wurde in einer stationären Einphasen-50 Hz-Wechselstrom-Schweißmaschine durchgeführt. In Anlehnung an DIN 44 750, Blatt 3, kamen direkt gekühlte Elektrodenkappen der Form B16 zum Einsatz. Als Elektrodenwerkstoff wurde eine Legierung aus CuCrZr nach DIN 44 759 Klasse A 2/2 verwendet. Zur Erzielung konstanter Punktdurchmesser war es notwendig die Elektrodenform geringfügig zu ändern und die Schweißdaten in Vorversuchen zu optimieren, um die geforderte Toleranz der Schweißpunkte mit $\pm 0,1\text{ mm}$ erfüllen zu können. Mit den ermittelten Schweißdaten war es dann möglich, alle Werkstoffvarianten mit einer Einstellung zu schweißen und konstante Punktdurchmesser zu erzielen. Dabei war die Maßgabe, daß die Schweißpunkt-Bruchflächen bei Ausknüpfversuchen innerhalb der vorgegebenen, engen Toleranzen konstant gehalten werden (Messungen in zwei senkrechten zueinander liegenden Achsen und Mittelwertbildung). Messungen an der längs durch den Schweißpunkt geschnittenen Probe können zu etwas anderen Ergebnissen führen.



4 Versuchseinrichtungen und Durchführung der Versuche

4.1 Versuchsaufbau

Nachdem für die konzipierte Punktschweißprobe eine Belastungskombination aus Kopfzug und Scherzug im Verhältnis 1:10 gefordert war, wurden dementsprechend vier gleiche Belastungseinrichtungen entwickelt. Dabei waren die einzelnen Punktschweißproben mit zwei U-förmigen Edelstahlprofilen an den Schenkeln eingespannt. Die Wirkungslinie der eingeleiteten Versuchskraft belastete die Probe unter einem Winkel von $5,71^\circ$ gegenüber der Trennfuge, entsprechend dem Verhältnis 1:10 von Kopfzug und Scherzug, Abb. 2. Die Versuchskraft wurde durch servohydraulische Eigenbauzylinder aufgebracht und durch Kraftmeßdosen erfaßt, Abb. 3. Die Krafteinleitung erfolgte derart, daß die Kraftwirkungslinie exakt durch die Mitte der Schweißlinse beider hintereinander eingebauten Proben lief.

4.2 Belastungsabläufe

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden überwiegend Schwingfestigkeitsversuche mit einstufiger Schwellbelastung durchgeführt. Dabei mußte aus versuchstechni-

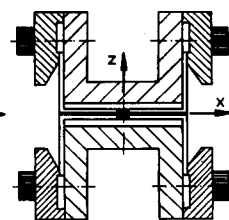


Abb. 2. Belastungsprinzip der punkgeschweißten Blechprobe.

Fig. 2. Principle of loading of the spot welded specimen.

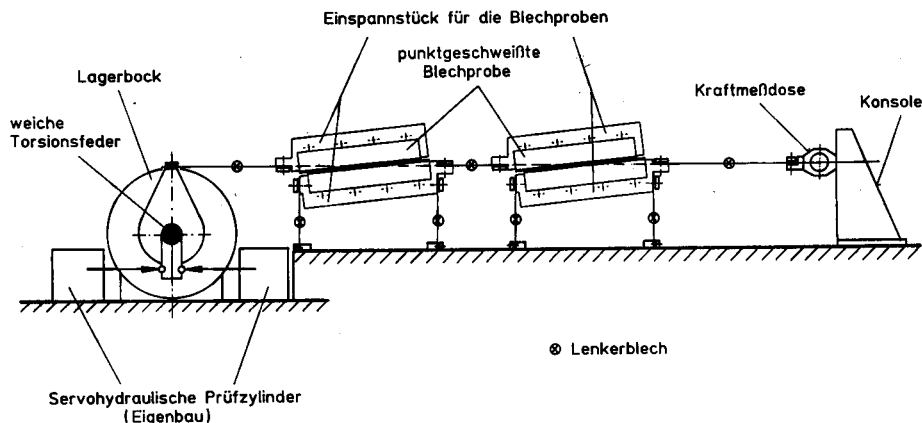


Abb. 3. Versuchsprinzip.

Fig. 3. Test principle.

schen Gründen eine Unterkraft F_u von 57 N eingehalten werden. Mit allen Varianten wurden außerdem Betriebsfestigkeitsversuche unter einem Gauß'schen Zufallsprozeß [15] mit einem Teilfolgenumfang von $H_0 = 10^5$ angesetzt, um einerseits Lebensdauerlinien zu ermitteln und um andererseits durch Gegenüberstellung der entsprechenden Wöhler- und Lebensdauerlinien die für die Schadensakkumulationsrechnungen erforderlichen tatsächlichen Schadenssummen zu ermitteln.

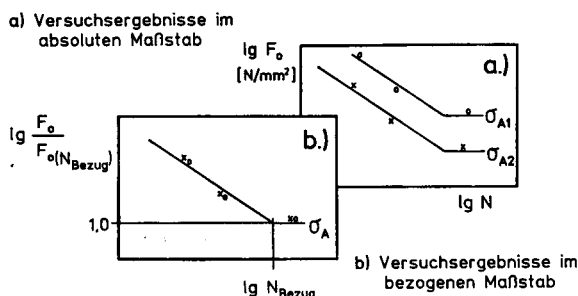
4.3 Umgebungsmedien

Neben den Schwingfestigkeitsversuchen an Luft wurden auch Versuche unter den korrosiven Umgebungsbedingun-

gen einer Tausalzlösung mit 5% NaCl-Gehalt durchgeführt. Darüber hinaus sollten Versuche mit einigen ausgewählten Versuchsvarianten den Einfluß von Kondenswasser auf die Schwingfestigkeit zeigen, das sich im betrieblichen Einsatz u.U. im Fügespalt bilden kann.

4.4 Versuchsdurchführung

Die Belastungsfrequenz der Proben betrug bei allen Varianten etwa 15 Hz. Die Wöhlerversuche an Luft wurden in der Regel im Bereich von $2 \div 5 \cdot 10^6$ Schwingspielen abgebrochen und die entsprechenden Proben z.T. auf einem höheren Belastungsniveau zu Bruch gefahren (hochgesetzte Durchläufer). Die Wöhlerversuche mit den korrosiven Medien wurden so angesetzt, daß Bruchschwingspielzahlen im Bereich von $N = 10^6$ bis $N = 10^7$ erwartet werden konnten. Versuche, bei denen die Probe bei etwa 10^7 Schwingspielen noch keinen Schaden erkennen ließ, wurden abgebrochen. Die stichprobenartigen Zufallslastenversuche überdecken den Schwingspielzahlbereich von $\bar{N} = 10^6$ bis $\bar{N} = 2 \cdot 10^7$. Das verwendete Versagenskriterium für die ermittelten Wöhler- und Lebensdauerlinien war ein halbkreisförmiger Bruch des Blechs um den Schweißpunkt.



5 Ergebnisse und Auswertungen

5.1 Vorgehensweise bei der Auswertung der Versuchsergebnisse

5.1.1 Konzept der normierten Wöhler- bzw. Lebensdauerlinien

Aufgrund der Beobachtung, daß bei der Darstellung von Schwingfestigkeitsergebnissen im doppellogarithmischen Netz Merkmale wie Neigung der Wöhlerlinie, Abknickpunkt und Streuung in ähnlicher Form auftraten, wurde für die Auswertung das Konzept der normierten Wöhlerlinie auf der Basis von Oberkräften zugrundegelegt [16, 17].

Gestützt auf Erfahrungen bei der Auswertung vergleichbar umfangreicher Versuchsprogramme an Stahlwerkstoffen wurden dazu jeweils Ergebnisse einheitlicher Versuchsvarianten, z. B. alle Versuchsergebnisse an Luft bei Einstufenbelastung, in bezogene Darstellungen überführt und in einem gemeinsamen, bezogenen Wöhlerfeld dargestellt, Abb. 4. Die Darstellung belegt eindeutig, daß allen Ver-

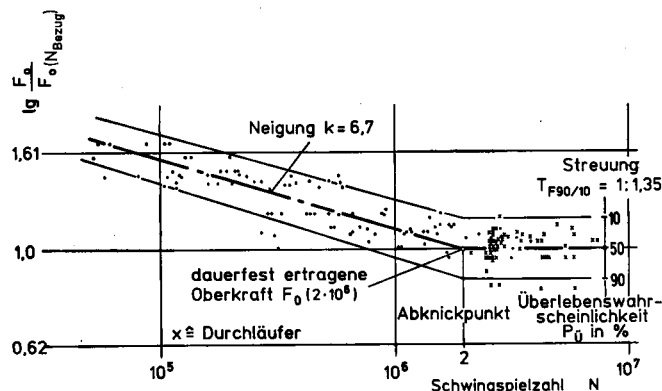


Abb. 4. Bezogenes Wöhlerlinienstreuband. Beispielhaft für alle Varianten für die Versuche an der Luft.

Fig. 4. Normalized scatter band of the S-N curve. Example for all test combinations in air.

5.2 Ertragene Kräfte

5.2.1 Ergebnisse der Wöhlerversuche

5.2.1.1 Versuche an Luft

Die Ergebnisse der Wöhlerversuche an Luft finden sich in zusammenfassender Darstellung als dauerhaft ertragene Oberkräfte ($P_{\bar{u}} = 50\%$) aller Varianten auf Abb. 7. Die Ergebnisse belegen mittlere, dauerhaft ertragene Oberkräfte $F_{0,D}$ ($P_{\bar{u}} = 50\%$) in den Grenzen 1450 N und 1020 N. Zur Bewertung dieser festgestellten Oberkräfte wurde für alle Varianten der Schweißqualität „1“ ($D > 5 \sqrt{s}$) ein gemeinsamer logarithmischer Mittelwert $F_{Mo} = 1230$ N gebildet. Damit errechnet sich für den genannten oberen Grenzwert von $F_0 = 1450$ N für die Werkstoffvariante 3–4 (elektrolytisch verzinkt 7 μm /feuerverzinkt 10 μm) eine prozentuale Abweichung vom gemeinsamen Mittelwert F_{Mo} von +18% und für den unteren Grenzwert von $F_0 = 1020$ N für die Werkstoffvariante 5–5 (feuerverzinkt, 10 μm , galvannealed) eine prozentuale Abweichung von –17%. Alle anderen Varianten schwanken um den Mittelwert F_{Mo} nicht mehr als $\pm 9\%$.

Für die Schweißqualität „2“ ($D < 4 \sqrt{s}$) wird ein gemeinsamer Mittelwert von $F_{Mo} = 1193$ N ermittelt. Die Schwankungsbreite beträgt analog dem Vorgenannten $\pm 11\%$.

Vergleicht man bei gleicher Variante die ermittelten, dauerhaft ertragenen Oberkräfte $F_{0,D}$ ($P_{\bar{u}} = 50\%$) der Schweißqualitäten „1“ und „2“ miteinander, werden deutliche Abminderungsbeträge bei der Variante mit schwarzem Blech (1–1) und mit elektrolytisch verzinktem Blech, Schichtdicke 7 μm , (3–3) von 15% bzw. 11% festgestellt. Die übrigen drei Varianten zeigen nur geringe Unterschiede in den dauerhaft ertragenen Oberkräften bei den beiden Schweißnahtqualitäten, Abb. 8.

5.2.1.2 Versuche mit 5% NaCl-Lösung

Unter dem Korrosionsmedium 5% NaCl-Lösung werden große Unterschiede der auf $N = 10^7$ bezogenen Oberkräfte F_0 ($P_{\bar{u}} = 50\%$) festgestellt, Abb. 9. Die Bandbreite der Werte reicht von 600 N für die Werkstoffkombination 1–2 (schwarzes Blech/elektrolytisch verzinkt, 2,5 μm) bis 1300 N für die Kombination 3–3 (elektrolytisch verzinkt, 7 μm). Für die Varianten 4–4 (feuerverzinkt, 10 μm) und

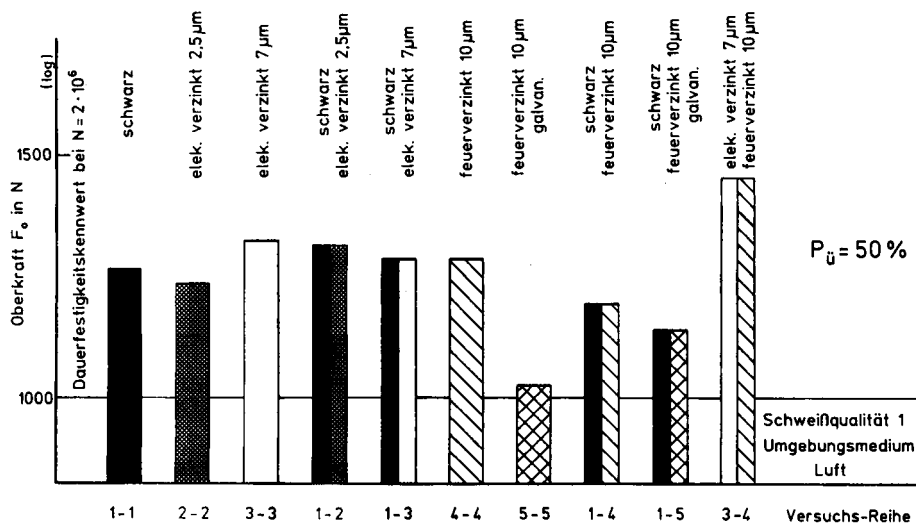


Abb. 7. Punktschweißverbindung (Einzelpunkt). Gegenüberstellung der dauerhaft ertragenen Oberkraft für $N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspiele.

Fig. 7. Spot welded connection (single spot). Comparison of endurable maximum load for $N = 2 \cdot 10^6$ cycles.

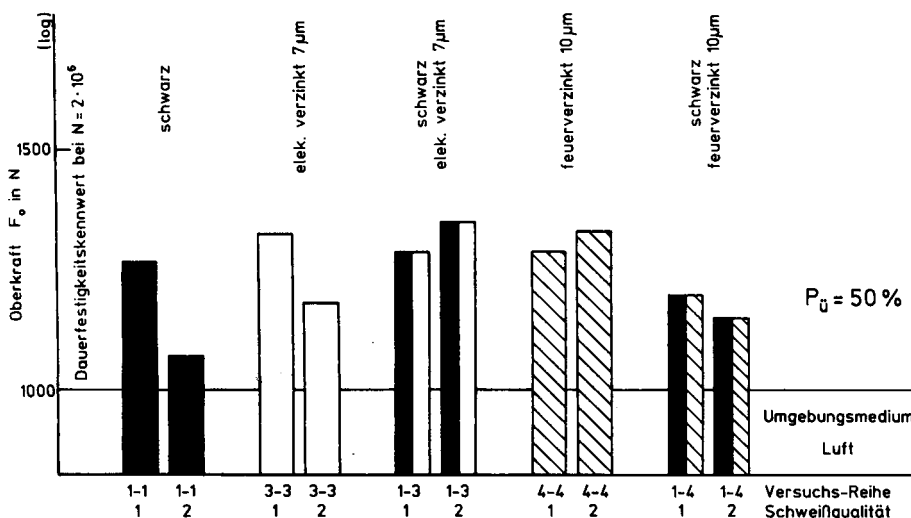


Abb. 8. Punktschweißverbindung (Einzelpunkt). Gegenüberstellung der dauerhaft ertragenen Oberkraft.

Fig. 8. Spot welded connection (single spot). Comparison of endurable maximum load for $N = 2 \cdot 10^6$ cycles.

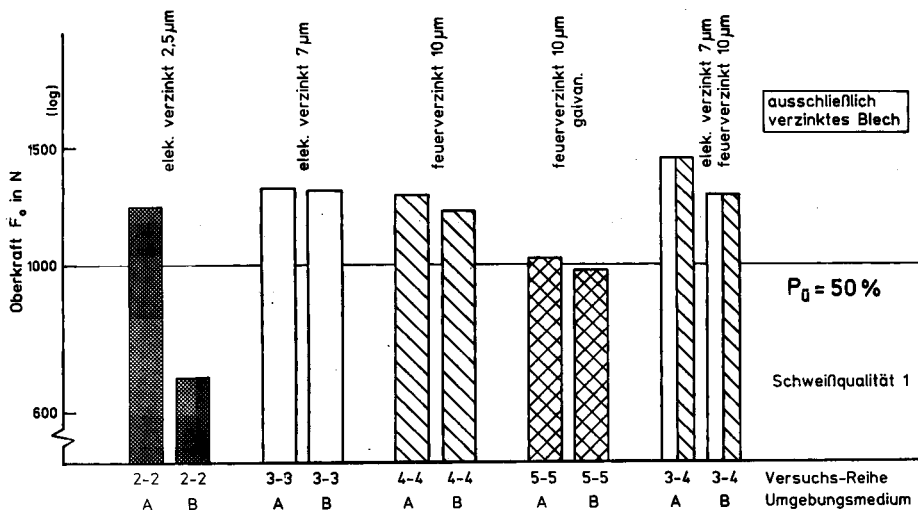


Abb. 11. Punktschweißverbindung (Einzelpunkt). Gegenüberstellung der ertragbaren Oberkraft an Luft und unter Korrosion für $N = 10^7$ Schwingspiele.

Fig. 11. Spot welded connection (single spot). Comparison of endurable maximum load in air and under corrosion for $N = 10^7$ cycles.

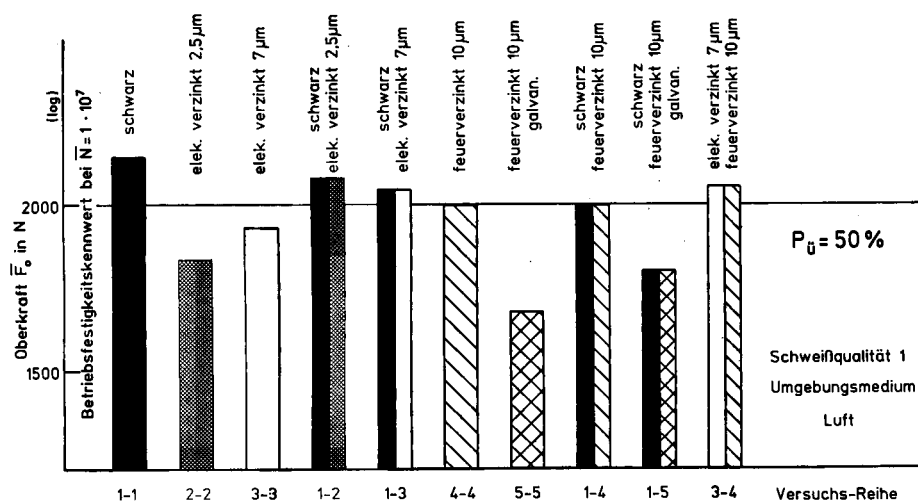


Abb. 12. Punktschweißverbindung (Einzelpunkt). Gegenüberstellung der Betriebsfestigkeitskennwerte \bar{F}_0 an Luft für $\bar{N} = 10^7$ Schwingspiele.

Fig. 12. Spot welded connection (single spot). Comparison of maximum spectrum load \bar{F}_0 in air for $\bar{N} = 10^7$ cycles.

Einzelwerte der Varianten von diesem rechnerischen Wert $+11\%$ bzw. -15% . Dabei sind die prozentualen Unterschiede zum gebildeten rechnerischen Mittelwert bei 60% aller Varianten nicht größer als $\pm 6\%$. Bezieht man jedoch die Ergebnisse der verschiedenen Varianten auf das unbeschichtete, schwarze Blech, das bei den Betriebsfestigkeitsversuchen die höchste Schwingfestigkeit aufweist, ergeben sich Abminderungsbeträge bis 23% .

Schwingfestigkeitswerte weisen die Varianten mit verzinkter Oberfläche beider durch Punktschweißung verbundenen Probenhälften auf, die praktisch die an Luft ermittelten Werte erreichen, ausgenommen die Variante mit Wärmebehandlung (galvannealed). Auf den Abb. 14 und 15 sind die Betriebsfestigkeitskennwerte \bar{F}_0 (10^7) für Luft und Korrosion gegenübergestellt und lassen bei Korrosion die höhere Belastbarkeit der verzinkten Varianten klar erkennen.

5.2.2.2 Versuche mit 5% NaCl-Lösung

Die Ergebnisse der Zufallslastenversuche unter Korrosion lassen ein differenziertes Verhalten der Varianten erkennen, Abb. 13. Die Varianten mit schwarzem Blech bzw. in Kombination mit elektrolytisch verzinktem Blech geringer Schichtstärke ($2,5 \mu\text{m}$) oder mit feuerverzinktem, wärmebehandeltem Blech (galvannealed) und die elektrolytisch verzinkte Ausführung mit nur $2,5 \mu\text{m}$ Schichtstärke zeigen gleich niedrige Schwingfestigkeitskennwerte (rd. $1400\text{--}1500 \text{ N}$). Deutlich günstigere Werte werden beobachtet, wenn mit dem schwarzen ein verzinktes Blech mit größerer Schichtstärke kombiniert wird ($7 \mu\text{m}$, elektrolytisch oder $10 \mu\text{m}$, feuerverzinkt). In diesen Fällen werden Werte von rd. $1800\text{--}1900 \text{ N}$ erreicht. Die günstigsten

5.3 Anriß- und Bruchschwingspielzahlen

Das Verhältnis von Anrißschwingspielzahl und Bruchschwingspielzahl N_A/N ist im untersuchten Schwingspielzahlbereich nicht signifikant abhängig vom Belastungshorizont innerhalb einer Versuchsreihe, auch nicht von der Blech- oder Verzinkungsart oder vom Umgebungsmedium. Es beträgt im Mittel rd. $0,8$. Dies bedeutet, daß mit dem gewählten Verfahren zur Erfassung eines technischen Anrisses bis zu diesem Anriß 80% der Gesamtlebensdauer sowohl im Einstufen- als auch im Betriebsfestigkeitsversuch verbraucht sind. Die Rißfortschrittsphase bis zum Versagen beträgt folglich nur noch 20% .

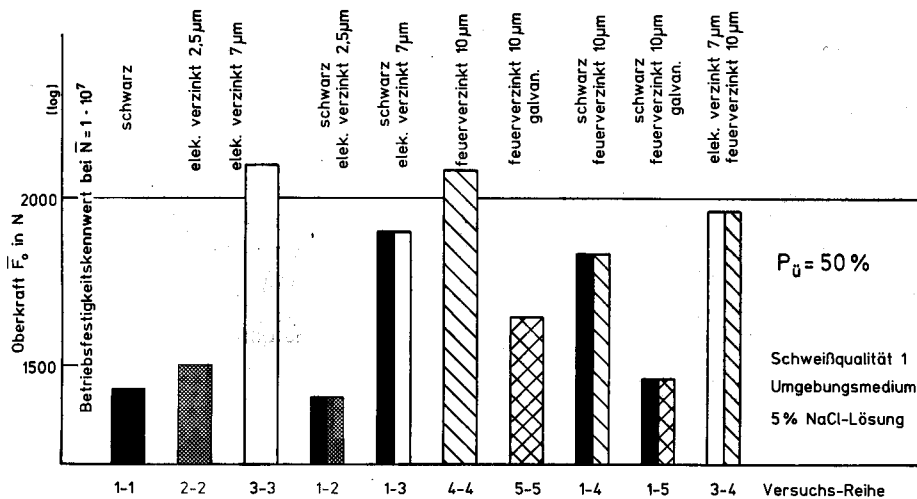


Abb. 13. Punktschweißverbindung (Einzelpunkt). Gegenüberstellung der Betriebsfestigkeitskennwerte \bar{F}_0 an Luft $\bar{N} = 10^7$.

Fig. 13. Spot welded connection (single spot). Comparison of maximum spectrum load \bar{F}_0 in air for $\bar{N} = 10^7$ cycles.

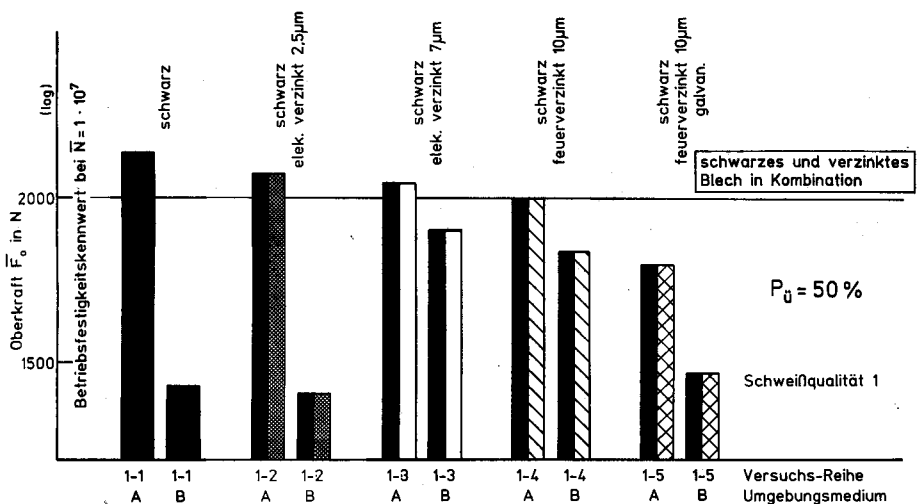


Abb. 14. Punktschweißverbindung (Einzelpunkt). Gegenüberstellung der Betriebsfestigkeitskennwerte \bar{F}_0 an Luft und unter Korrosion für $\bar{N} = 10^7$ Schwingspiele.

Fig. 14. Spot welded connection (single spot). Comparison of maximum spectrum load \bar{F}_0 in air and under corrosion for $\bar{N} = 10^7$ cycles.

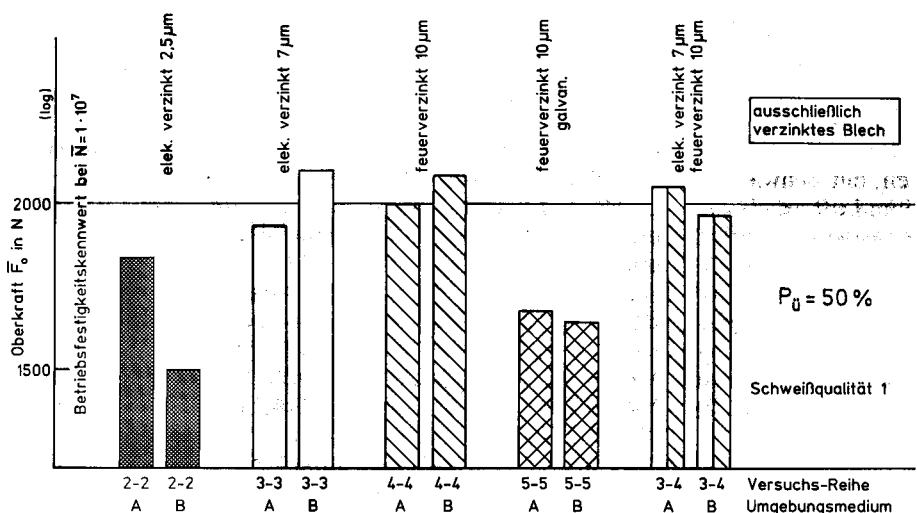


Abb. 15. Punktschweißverbindung (Einzelpunkt). Gegenüberstellung der Betriebsfestigkeitskennwerte \bar{F}_0 an Luft und unter Korrosion für $\bar{N} = 10^7$ Schwingspiele.

Fig. 15. Spot welded connection (single spot). Comparison of maximum spectrum load \bar{F}_0 in air and under corrosion for $\bar{N} = 10^7$ cycles.

5.4 Bruchlagen

Über alle Varianten wurden drei typische Bruchlagen festgestellt. Dabei werden als Bruchausgangsstellen bei der überwiegenden Zahl der Proben die Ränder der Schweißpunkte zwischen den Blechen erkannt. Bei einigen Versu-

chen hingegen geht der Schwingbruch einige zehntel Millimeter vor dem Schweißpunkt an einer durch das Fertigen des Schweißpunktes entstandenen Kerbe im Blech aus. Die an dieser Stelle durch die vorhandene Form hervorgerufene Spannungskonzentration führt zu einer Spannungsüberhöhung, die die Schwingfestigkeit für die-

sen Bereich absenkt. Bei günstigeren Punktschweißparametern könnte hier eine Erhöhung der Schwingfestigkeit und damit verbunden ein Gewinn an ertragbarer Belastung der Punktschweißprobe möglich sein. Als weitere, selten beobachtete Bruchlage tritt der Riß quer durch den Schweißpunkt auf.

6 Diskussion der Ergebnisse

6.1 Einfluß der Überzugarten auf die ertragbaren Belastungen

Die dauerhaft ertragenen Oberkräfte, abgeleitet aus den Versuchen an Luft mit gutem Schweißpunkt, weisen zwei Besonderheiten auf, nämlich die relativ niedrigen Werte für die beiden Varianten 1–5 und 5–5 mit dem nach dem Verzinken wärmebehandelten Blech mit $F_0 = 1125 \text{ N}$ und $F_0 = 1020 \text{ N}$ und der relativ hohe Wert für die Variante 3–4 aus der Kombination von elektrolytisch und feuerverzinktem Blech mit $F_0 = 1450 \text{ N}$. Für letzteres Phänomen konnte keine Erklärung gefunden werden. Die Ursache der niedrigen Werte der Proben mit dem feuerverzinkten und anschließend wärmebehandelten Blech dürfte in der Verformung der Bleche beim Punktschweißen zu finden sein. Bei diesen beiden Varianten 1–5 und 5–5 gehen die Anrisse ausschließlich etwa 0,4 mm vor dem Schweißpunkt an einer durch das Fertigen des Schweißpunktes entstandenen Kerbe im Blech aus. Ein Gewinn an ertragbarer Belastung der Punktschweißprobe ist, wie schon zuvor erwähnt, möglich. Werden die drei angesprochenen Versuchsreihen aus der Betrachtung ausgeklammert, streuen die dauerhaft ertragenen Oberkräfte mit + 4% und – 6% um den gemeinsamen Mittelwert von 1248 N nur wenig.

Das gleiche gilt für die Proben aus feuerverzinktem und wärmebehandeltem Blech im Betriebsfestigkeitsversuch. Auch hier liegen formgebungsbedingt die Bruchlagen etwa 0,4 mm vor dem Schweißpunkt an einer beim Fertigen des Schweißpunktes entstandenen Kerbstelle und die ermittelten ertragenen Kräfte sind im Vergleich zu den anderen Varianten relativ gering.

Wie die Ergebnisse der Einstufenversuche unter dem Korrosionsmedium 5% NaCl-Lösung zeigen, fallen die ertragenen Belastungen aller Varianten mit schwarzem Blech gegenüber dem Umgebungsmedium Luft erheblich, z. T. auf unter 50%, ab. Der negative Korrosionseinfluß wirkt sich dabei erst ab Schwingspielzahlen größer 10^6 derart aus, daß eine Dauerfestigkeitsgrenze ab $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen nicht existiert, sondern ein extremer Abfall der ertragenen Belastungen mit zunehmender Schwingspielzahl festgestellt wird. Die Neigung der Wöhlerlinie mit $k' = 2,6$ wird gegenüber derjenigen an Luft ($k = 6,7$) wesentlich steiler.

Ein geringer positiver Einfluß auf die Korrosionsschwingfestigkeit bei Blechkombinationen schwarzes Blech/verzinktes Blech, durch Schutzwirkung des Zinküberzugs auf das unverzinkte Blech kann nicht ausgeschlossen werden. Bei den Varianten aus schwarzem Blech in Kombination mit verzinkten Blechen mit den größeren Zinkschichtdicken, also 1–3, 1–4, 1–5, wird zwar tendenziell ein etwas geringerer Schwingfestigkeitsverlust bei gleicher Schwingspielzahl unter Korrosion gegenüber Luft verzeichnet, eine Schutzwirkung, die Korrosion ausschließt, ist jedoch nicht festzustellen. Auch bei diesen

Varianten ist der Steilabfall der Wöhlerlinie zu beobachten. Da jedoch diese Neigungsänderung von $k = 6,7$ zu $k' = 2,6$ etwas zu höheren Schwingspielzahlen verschoben ist, sind die relativen Verluste an ertragbarer Oberkraft bei Bezug auf eine feste Schwingspielzahl, z. B. 10^7 , geringer.

Ebenso resultiert aus den Ergebnissen der Wöhlerversuche, daß eine zu geringe Zinkschichtdicke, wie bei der Variante 2–2 (elektrolytisch verzinkt, 2,5 µm Schichtdicke), keine Schutzwirkung gegen eine höherprozentige Salzlösung – im untersuchten Fall 5% NaCl-Lösung – ausübt.

Ähnliche Relationen liegen bei den Betriebsfestigkeitsversuchen vor.

Keinen die ertragbaren Belastungen absenkenden Einfluß sowohl bei den verzinkten als auch bei den unverzinkten Blechvarianten wurde beim Umgebungsmedium Kondenswasser bei den durchgeführten Schwingfestigkeitsversuchen festgestellt.

Bei den angesprochenen korrosionsgefährdeten Versuchsvarianten muß darüber hinaus beachtet werden, daß die ertragbaren Belastungen mit höheren Schwingspielzahlen als $N = 10^7$ weiter absinken. Daher sollte aus Sicherheitsgründen bei Dimensionierungsaufgaben in einem Schwingspielzahlbereich von $N > 10^7$ eine geradlinige Verlängerung der Korrosionswöhlerlinie angenommen werden.

6.2 Bewertung der Betriebsfestigkeitsversuche zur Berechnung der Lebensdauer anhand von Schadenssummen

Schädigungsrechnungen zeigen [14], daß die tatsächlich gültigen Schadenssummen für das Umgebungsmedium Luft zwischen 0,21 und 1,06 liegen; für das Korrosionsmedium 5% NaCl-Lösung werden Werte zwischen 0,31 und 1,25 ermittelt. Bei der Vielzahl der untersuchten Probenvarianten mit unterschiedlichen Überzugarten ist jedoch eine differenzierte Betrachtung erforderlich.

Bei den mit Hilfe der Ergebnisse der Versuche an Luft berechneten Schadenssummen ist offensichtlich, daß bei denjenigen Versuchsreihen mit verzinkten Proben niedrige Schadenssummen festgestellt werden ($D = 0,24\text{--}0,37$), falls wenigstens ein Probenteil elektrolytisch verzinkt ist (Variante 2–2, 3–3, 3–4). Für die Probe aus schwarzem Blech (Variante 1–1) wird eine Schadenssumme von rd. 1 ermittelt. Für alle anderen Varianten liegt der Wert zwischen rd. 0,5 und 0,9.

Die aus den Korrosionsschwingfestigkeitsversuchen unter 5% NaCl-Lösung berechneten Schadenssummen liegen zwischen 0,31 und 1,25. Hier zeigt sich, daß die Varianten, bei denen beide Bleche verzinkt sind (außer Variante 2–2, elektrolytisch verzinkt, 2,5 µm Schichtdicke) die niedrigsten Schadenssummen aufweisen ($D = 0,31\text{--}0,67$). Die Schadenssummen für Varianten mit schwarzem Blech liegen zwischen 0,6 und 1,26. Die zuvor erwähnte Variante 2–2 ist bei höheren Schwingspielzahlen $\bar{N} \geq 10^7$ den Varianten mit schwarzem Blech, bei niedrigen Schwingspielzahlen $\bar{N} \approx 10^6$ den Versuchsreihen mit verzinktem Blech zuzuordnen.

Wegen der großen Streubreite der berechneten Schadenssummen ist eine Pauschalierung im Sinne der Angabe eines unteren zulässigen Wertes für alle Varianten, wie z. B. $D_{\text{zul}} = 0,2$, nicht sinnvoll. Unter den vorgegebenen Randbedingungen kann für das Umgebungsmedium Luft bei

elektrolytisch verzinkten, punktgeschweißten Blechen eine Schadenssumme von 0,2, bei den feuerverzinkten Varianten sowie bei allen mit schwarzem Blech kombinierten Verbindungen eine Schadenssumme von 0,5 und bei ausschließlich schwarzem Blech eine solche von 1 angesetzt werden. Für das Umgebungsmedium 5% NaCl-Lösung betragen die entsprechenden Werte bei den Varianten mit verzinktem Blech 0,3, bei allen mit schwarzem Blech kombinierten Varianten 0,6.

7 Schlußfolgerungen für die Praxis und Ausblick

Wie die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, sind Punktschweißverbindungen mit elektrolytisch verzinkten ($7\text{ }\mu\text{m}$ Zinkschichtdicke) und feuerverzinkten ($10\text{ }\mu\text{m}$ Zinkschichtdicke) Blechen in ihrem Schwingfestigkeitsverhalten bei den korrosiven Umgebungsbedingungen einer Tausalzlösung mit 5% NaCl als gleichwertig anzusehen. Schwingfestigkeitsverluste gegenüber Luft können nicht festgestellt werden. Daher sind diese Überzüge besonders dann anzuwenden, wenn die punktgeschweißten Blechkonstruktionen Umwelteinflüssen ausgesetzt sind, wie z. B. beim Einsatz im Kraftfahrzeugbau. Bleche mit dünnen Zinkschichten – im untersuchten Fall mit einer Schichtdicke von $2,5\text{ }\mu\text{m}$ – sind für den genannten Einsatz nicht geeignet, da keine ausreichende Schutzwirkung erzielt wird. Ebenso wenig dürfen punktgeschweißte Blechkonstruktionen aus schwarzem Blech und verzinktem Blech korrosiver Umgebung ausgesetzt sein, da ein vermuteter Schutzeffekt des verzinkten Bleches für das schwarze Blech nicht nachgewiesen werden konnte.

Im Hinblick auf eine Lebensdauerabschätzung auf der Basis von Einstufenversuchen läßt sich aus den Ergebnissen die Empfehlung ableiten, Schadensakkumulationsrechnungen für punktgeschweißte Feinbleche nach der elementaren Miner-Regel durchzuführen und die im Abschnitt 6.2 vorgeschlagenen zulässigen Schadenssummen zu berücksichtigen. Bei einem korrosiven Umgebungsmedium wird für schwarzes Blech auch in Verbindung mit verzinktem Blech dabei die experimentell ermittelte Korrosionswöhlerlinie zugrundegelegt.

8 Zusammenfassung

Durch das Forschungsvorhaben wurden Schwingfestigkeitskennwerte unter schwellender Belastung für punktgeschweißte, unverzinkte und verzinkte Feinbleche der Sorten St 14 nach DIN 1623 und Sorte V nach DIN 17 162 mit einer Blechdicke von $s = 0,88\text{ mm}$ bestimmt. Den Ergebnissen an Luft wurden Schwingfestigkeitswerte gegenübergestellt, die aus Versuchen unter den korrosiven Umgebungsmedien 5% NaCl-Lösung und Kondenswasser ermittelt werden. Durch Gegenüberstellung entsprechender Wöhler- und Lebensdauerlinien ausgewählter Schwerpunktvarianten konnten Schadensakkumulationsrechnungen durchgeführt und tatsächliche Schadenssummen berechnet werden.

Die Ergebnisse der Einstufenversuche unter dem Korrosionsmedium 5% NaCl-Lösung belegen einen erheblichen Abfall der ertragenen Belastungen, z. T. über 50%, aller Varianten mit schwarzem Blech gegenüber den Werten an

Luft. Eine Dauerfestigkeitsgrenze im Bereich von $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen, wie bei den Versuchen an Luft oder bei den verzinkten Blechproben mit Zinkschichtdicken von $7\text{ }\mu\text{m}$ bzw. $10\text{ }\mu\text{m}$ unter Korrosion, existiert nicht. Es wird vielmehr in dem erwähnten Schwingspielzahlbereich der Beginn eines extremen Abfalls der ertragenen Belastungen mit einem Übergang der Wöhlerlinienneigung von $k = 6,7$ auf $k' = 2,6$ festgestellt. Eine Schutzwirkung bei der Kombination von schwarzem und verzinktem Blech in der Punktschweißverbindung kann praktisch negiert werden. Keinen die ertragenen Belastungen absenkenden Einfluß hat das Umgebungsmedium Kondenswasser hervorgerufen. Aus den Ergebnissen der Wöhlerversuche resultiert ebenso, daß eine zu geringe Zinkschichtdicke, wie z. B. $2,5\text{ }\mu\text{m}$, keine ausreichende Schutzwirkung für den Schweißpunktbereich gegen die 5% NaCl-Lösung ausübt.

Ähnliche Relationen, wie zuvor erwähnt, liegen bei den Ergebnissen der Betriebsfestigkeitsversuche vor.

Die Gegenüberstellung der ermittelten Wöhler- und Lebensdauerlinien durch Schadensakkumulationsrechnungen nach der elementaren Miner-Regel führt auf tatsächliche Schadenssummen je nach Variante und Umgebungsmedium zwischen 0,21 und 1,25.

Danksagung

Dem *Gemeinschaftsausschuß Verzinken (GAV)*, Düsseldorf, und dessen Geschäftsführer, Herr Dipl.-Ing. H. Böttcher, sei für die Unterstützung bei der Durchführung der vorliegenden Untersuchung, der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), Köln, für die Förderung (AiF-Nr. 7553) und der *Thyssen Stahl AG*, Duisburg, für die Probenfertigung an dieser Stelle gedankt.

Ebenfalls gebührt ein Dank Herrn Dipl.-Ing. Selige i.R. (Thyssen Stahl AG, Duisburg) der das Projekt betreut hat sowie Herrn Dipl.-Ing. Lohbrandt (ehem. Thyssen Stahl AG, Duisburg), der für die Herstellung der Proben und deren Qualitätsüberprüfung verantwortlich war.

9 Schrifttum

1. H. A. Crostack, Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten von Punktschweißverbindungen mittels Schallemissionsanalysen. Dissertation Univ. Dortmund (1976).
2. K.-H. Kock, H.-D. Steffens, H.-A. Crostack, Untersuchung der Schallquellencharakteristik von Signalen des Punktschweißprozesses. *Materialprüfung* 20 (1978), H. 2, S. 75–79.
3. S. Langrock, Möglichkeiten der Prüfung von Punktschweißverbindungen. *ZIS-Mitteilungen* 22 (1980) Nr. 8, S. 900–909.
4. H.-J. Krause, Möglichkeiten der Qualitätssicherung für Schweißverbindungen an dünnen Blechen in der Serienfertigung. In: Bauteile '85. Hrsg. Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung, Berlin (1985), S. 99–112.
5. A. Rupp, Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Punktschweißverbindungen unter Schwingbelastung – ein Auslegungsverfahren. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt LBF-Bericht Nr. FB-198 (1992).
6. K. Kußmaul, G. Mall, Die Auswirkung von Fehlstellen auf das Festigkeitsverhalten von widerstandsgeschweißten Vielpunktverbindungen. In: Fachbuchreihe Schweißtechnik, Düsseldorf, Bd. 58 (1970), S. 1–13.

7. J. L. Overbeeke, Dauerfestigkeit von punktgeschweißten Überlappverbindungen. *Metal Construction 11* (1979) Nr. 2, S. 81–83.
8. T. Iwasaki, J. Tanoka, M. Kabasawa, M. Nagae, Dauer-schwingfestigkeit von Grundmetall und punktgeschweißten Verbindungen hochfester niedriglegierter (HSLA) Stähle für die Automobilindustrie. *Nippon Kokan Technical Report Overseas 34* (1982) 31–40.
9. J. A. Davidson, A Review of the fatigue properties of spot-welded sheet steels. SAE Paper 830033 (1983).
10. Widerstandspunktgeschweißte Proben zur Ermittlung der Schwingfestigkeit. Merkblatt DVS 2709. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1983.
11. F. Eichhorn, B. H. Schmitz, Vergleichende Prüfung standardisierter punktgeschweißter Hohlprofile aus Stahlblech mit und ohne zusätzliche Verklebung der Fügespalte. *Schweißen und Schneiden 36* (1984) H. 3, S. 113–116.
12. O. Buxbaum, Betriebsfestigkeit – Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile. Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf (1992) 2. Auflage.
13. H. W. Graßhoff, U. Teuhaven, Oberflächenveredelte Feinbleche – Stahl mit Zukunft. *Stahl u. Eisen 110* (1990) Nr. 12, S. 61–70.
14. K. Dieterich, C. M. Sonsino, Schwingfestigkeitsverhalten punktgeschweißter verzinkter Feinbleche ohne und mit Korrosionseinfluß. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt (1993). Abschlußbericht des AiF-Vorhabens Nr. 7553.
15. R. Fischer, H.-G. Köbler, U. Wendt, Synthese zufallsartiger Lastfolgen zur Anwendung bei Betriebsfestigkeitsversuchen. Fortschrittsbericht VDI-Z. Reihe 5, Nr. 40 (1979).
16. E. Haibach, C. Matschke, Betriebsfestigkeit von Kerbstäben aus Stahl Ck 45 und Stahl 42 CrMo4. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt. Bericht Nr. FB-155 (1980).
17. E. Haibach, C. Matschke, Normierte Wöhlerlinien für ungekerbte und gekerbte Formelemente aus Baustahl. *Stahl u. Eisen 101* (1981) Nr. 3, S. 21–27.

Anschrift: Dipl.-Ing. K. Dieterich, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF), Bartningstr. 47, 64289 Darmstadt.

[T 664]